

Study on the wake structure and associated plasma wave turbulence observed by using sounding rocket experiments

著者	山本 真行
号	44
学位授与番号	1839
URL	http://hdl.handle.net/10097/38835

氏名・(本籍)	やま もと まさ ゆき 山 本 真 行
学位の種類	博 士 (理 学)
学位記番号	理博第1839号
学位授与年月日	平成13年3月26日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地球物理学専攻
学位論文題目	Study on the wake structure and associated plasma wave turbulence observed by using sounding rocket experiments (観測ロケットによる航跡構造と航跡関連プラズマ擾乱の研究)
論文審査委員	(主査) 教授 小 野 高 幸 教授 森 岡 昭, 福 西 浩, 岡 野 章 一 助教授 飯 島 雅 英

論 文 目 次

Acknowledgements

Preface

1 Introduction

- 1.1 Wake structures caused by the fast moving bodies in plasma
- 1.2 A review of experimental and theoretical studies on wake
 - 1.1.1 Wake structure around the fast moving vehicles
 - 1.1.2 Plasma turbulence inside the wake structure
 - 1.1.3 Wake effects identified near the Moon and other small satellite bodies
- 1.3 Purpose of this thesis

2 Instrumentation for the rocket experiments

- 2.1 Measurement of the upper hybrid resonance by Impedance Probe (NEI)
- 2.2 Detection of HF-range plasma waves by a spectrum analyzer (PWH)
- 2.3 Brief description of some other instruments referred on this study
- 2.4 Operation and data handling of rocket observation data

3 Results of S-520-21 rocket experiment in the auroral ionosphere

- 3.1 Overview of the experiment
- 3.2 Electron density profile detected by NEI
- 3.3 HF-range plasma wave spectrum observed by PWH
- 3.4 Identification of the wake effect

4 Wake structures around the moving rocket bodies

- 4.1 S-310-28 rocket experiment
 - 4.1.1 Overview of the experiment

- 4.1.2 Electron density profile detected by NEI
- 4.1.3 Detailed wake structures around the rocket body
- 4.1.4 Determination of absolute attitude of the rocket
- 4.2 Applied model of wake structures around the moving vehicles
- 4.3 Model calculations of wake structures
 - 4.3.1 Dependence on *Mach* number
 - 4.3.2 Effects of the obstacle shape and the attitude of the rockets
 - 4.3.3 Effects of the length of the electrode of NEI
 - 4.3.4 Detailed comparison between model calculation and measurement
- 5 HF-range plasma waves associated with the wake turbulence
 - 5.1 SS-520-1 rocket experiment
 - 5.1.1 Overview of the experiment
 - 5.1.2 Electron density profile detected by PWM-I
 - 5.1.3 Plasma wave observation in mid-latitude ionosphere by PWM-W
 - 5.2 Identification of UHR waves in the wake
 - 5.3 UHR waves in the upper ionosphere plasma
- 6 Wake turbulence and associated wave-particle interactions
 - 6.1 Temperature distribution in the wake region
 - 6.1.1 Estimation method of the electron temperature by sheath capacitance
 - 6.1.2 Temperature distribution of the wake
 - 6.2 Plasma waves possibly generated due to the wake turbulence
 - 6.2.1 Possible mechanism of plasma instability in the wake region
 - 6.2.2 A wake turbulence model
- 7 Discussion
- 8 Conclusion

Bibliography

Appendix 1

Appendix 2

博 士 論 文 要 旨

ロケットによる電離層プラズマの直接観測において、超音速の飛翔体自身がその後方に形成する航跡(wake)効果による密度分布の擾乱は観測に常に影響を与える重要な問題である。Wakeはその密度構造だけでなく、急峻な密度勾配により発生すると考えられるプラズマ擾乱の研究において興味深い研究対象である。本研究は、インピーダンスプローブ(NEI)により計測した高精度電子密度観測結果と、HF帯域プラズマ波動スペクトルアナライザ(PWH)によるプラズマ波動観測からwake関連プラズマにおけるプラズマ擾乱をその研究対象としている。本博士論文の目的は1994年11月より1999年2月までに実施された7機のロケット観測結果中、特にS-520-21号機のPWH,NEI, S-310-28号機のNEI, 及びSS-520-1号機の

PWMによる観測から wake 密度構造とその内部で発生するプラズマ擾乱についてその実態と発生メカニズムの詳細を究明するものである。

まず電子密度観測における wake 効果の問題を解決しその観測精度向上を図るため、比較的静穏な状態の中緯度電離圏において wake 周辺における電子密度分布を高時間分解能計測し wake の詳細な構造を観測した。即ち 1999 年 2 月 2 日に文部省宇宙科学研究所鹿児島スペースセンター(KSC)から打上げられた S-310-28 号観測ロケット搭載の NEI による電子密度計測において、スピン面内に正反対方向に展開させた長さの異なる 2 本のプローブを切り替えて観測し、wake 効果のモデル計算との詳細な比較により wake 密度構造の研究を行った。

電子密度計測における wake 効果の検討には時々刻々の NEI プローブの観測方向とロケット飛翔方向との関係が重要であり、ロケット飛翔の絶対姿勢の決定が不可欠である。地磁気姿勢計のデータを用いて機軸と磁場方向のなす角、並びにスピフェーズを得るとともに、本研究では NEI によって得られた電子密度計測値に現われる wake による密度減少効果が極大となる点を解析することによってプリセッション運動を含む絶対姿勢の決定に成功した。

観測された密度変動の主な要因が wake による効果であることを検証するため、モデル計算との詳細な比較を行った。本研究で用いた wake 構造のモデルは、Al'pert ら(1965)により提唱されたモデルをロケット観測における座標系に応用した Oya(1970)のモデルである。モデルにおいては、ロケット飛翔速度の特性パラメータであるマッハ数はイオンの熱速度に対する比として与えられるが、イオン熱速度を求めるため MSIS86 中性大気モデルから中性大気温度を求め wake モデルに代入した。飛翔体の特性長は数十 cm から数 m のオーダーであり、電離層においてはイオンのラーマー半径に比べて十分小さい。その結果局所的な磁場の影響は無視でき、イオンは中性大気粒子と同等の振る舞いをする事となる。粒子間の衝突については、飛翔体程度の大きさをとる wake の形成領域が粒子の平均自由行程に比べ十分小さいため無視する。Wake に流入する ambient なプラズマは Maxwell 分布していると仮定し、X,Y 方向の特性長で定義される長方形領域が飛翔体通過時に真空になったとしてプラズマの流入を計算した。

観測とモデル計算の比較結果を、モデル計算に用いる各パラメータについて整理する。まずマッハ数は wake の形状に大きく寄与するが、MSIS86 中性大気モデルを用いた仮定によるモデル計算は用いたマッハ数が wake 最深部の密度減少を良く再現する結果を確認した。飛翔体の形状もまた wake の構造に大きな影響を与えるパラメータである。Al'pert-Oya のモデルでは円筒形の飛翔体を仮定してその断面である長方形の特性長 R_x, R_y を用いて計算を行うが、特にロケット頭胴部の形状は観測機器が積層した複雑な形状をしており、この近似の適用には問題があることが判明した。モデル内における遮蔽物の断面形状をロケット頭胴部にフィッティングさせた台形の積層で置き換え、時々刻々のプローブと遮蔽物の位置関係を用いた計算を実施し良好な結果を得た。

S-310-28 号ロケット搭載の NEI では 2 本のプローブを用いたがこのうちサブプローブがロケット中心軸から離れた位置に搭載された。このオフセット効果とプローブの長さ方向への感度特性についても詳細な検討を実施した。その結果、オフセット効果はロケット観測のように飛翔体本体と同程度の大きさの wake 構造観測の際には重要な役割をもつことが確認された。プローブ特性は長さ方向にはリニアであると考えた場合に良い結果を得ることが確認された。

以上のモデル計算と観測結果との比較では従来 wake 中心においても 15～20% 程度あった誤差が、すべての位相角に対する標準偏差で 5% 以内に収まる精度を得ることとなった。ただし、ロケット飛翔の末期に相当する下降時の高度 155km 以下では、ロケット機軸と進行方向のなす角が 90 度以上となり機体最後方の尾翼の影響などを受ける結果、モデル計算との差が 20% から 60% となる点が特定のスピフェーズに対して生ずることが判明した。

本研究で用いた wake モデルの発展形としてローカルな磁場の影響を考慮に入れたモデルについての検討も行ったが、本研究の結果では磁場の影響を考慮に入れない場合の方が観測を良く近似することとなった。しかし磁場の効果はスペースシャトルやスペースステーション等、より大きな特性長を持つ飛翔体の場合や、さらに無磁場天体と太陽風プラズマとの相互作用における wake 効果においては重要な事柄になると考えられる。

一方1994年に実施された極域電離圏におけるロケット観測により wake 中のプラズマパラメータに依存する周波数領域に UHR 波動と考える波動が発見されたが、この際のロケット姿勢が安定でなかったため観測された波動の厳密な解釈には未解決の問題が残されていた。この wake 中のプラズマパラメータに依存する UHR 波動について、その存在を確認し発生メカニズムを明らかにするため、静穏な中緯度電離圏においての確認実験を行った。1998年2月5日に KSC から打上げられた SS-520-1 観測ロケットにおいては、搭載したプラズマ波動観測装置(PWM-W)によって HF 帯プラズマ波動観測を実施し、中緯度プラズマ圏において「あけぼの」衛星などで常に観測されている UHR 波動の観測下限高度について調査するとともに、wake 中における波動現象についての確認実験をオーロラ粒子の降り込みなどアクティブな条件にない静穏な中緯度電離圏において実施した。

静穏な中緯度電離圏において観測されたプラズマ波動は wake 中のプラズマ特性周波数に依存するものであり、wake 内で励起された UHR 波動であることが確認された。この wake 内 UHR 波動の発生メカニズムについては、wake 領域に周辺プラズマが流入する際、遮蔽物両側の境界領域から流入したプラズマ流が wake 中心領域において2流体不安定型のプラズマ不安定を起こす結果発生するというメカニズムを提案した。発生した UHR 波動は wake 密度構造による cavity を伝播しロケット搭載プラズマ波動観測装置によって観測されると解釈される。またロケット飛翔の最高々度750km付近で見出された UHR 波動については「あけぼの」衛星で観測されているような自然 UHR 波動成分が微弱ながら確認された。この観測結果 wake による成分との分離など困難はあるが、free energy が UHR 波動を引き起こすのに十分な領域の下限高度は500km程度であることが明らかとなった。

さらに、インピーダンスプローブによる観測結果を用いての電子温度の推定について検討し、wake 中における電子温度の特性を解析した。その結果 S-310-28 ロケット実験においても wake 中心領域において従来から報告のある様な電子温度の上昇が見出され、wake 中における電子温度が周辺プラズマにおける電子温度の約2倍となる結果を得た。さらに特に注目すべき現象として、wake 境界領域において周辺プラズマの3倍程度の電子温度を示す領域が新たに確認された。この現象はプローブが wake 境界を突き抜けてその密度勾配方向に向いた際、プローブ根元の1/6のみが wake 領域に、他の部分が ambient な領域にある時に観測されており、プローブのリニアな感度特性を仮定した場合 wake 最深部は8000Kの温度であったと推定される。このことは境界領域の密度勾配により激しいプラズマ擾乱が起きていることを示唆しており、wake 中でのプラズマ擾乱が引き起こすプラズマ不安定による UHR 波動が存在するとした仮説を支持する結果を得た。

論文審査の結果の要旨

ロケットや人工衛星など飛翔体を用いて宇宙空間プラズマの密度、温度等の直接観測を行う場合に、測定プローブがプラズマの場を乱すために発生する測定上の誤差の問題は、古くから様々な問題に対しての研究がなされてきた。山本真行提出の論文は、この問題に関わり、超音速で飛翔するロケットの後方に形成される航跡(wake)の構造を、ロケットを用いた実験研究と理論研究の両面から究明し、wake内のプラズマ密度構造やプラズマ擾乱の実態を明らかにしたものである。

論文ではまず、極域電離層内でのロケット観測を行い、オーロラ電離層内の電子密度分布にwake効果が現れていること、更に、オーロラ粒子によって電離層プラズマ中に発生しているプラズマ波動現象の中には、周囲のプラズマの特性量を用いたプラズマ波動の分散関係を満たすことのできない周波数スペクトルを呈する部分があることを見出し、このプラズマ波動がwake中に発生したものであるとの仮説を得た。次にwake構造を厳密に調べるロケット実験を行い、wake構造の解明に直接関わる成果として、wakeの影響により発生する周辺プラズマ密度計測の誤差を約5%以内と、従来のロケット観測が持っていた誤差の1/3～1/10にまで低減することに成功した。論文中では、これまでのwakeモデルの取り扱いにおいては省みられなかった厳密なロケット形状、外部磁場効果、中性大気温度とイオン温度との差違について定量的な評価が行われ、プラズマ密度計測の精度向上だけでなく、宇宙空間プラズマ物理学の問題として、wakeモデルをより厳密に確立するための重要な実験事実を明らかにしている。更に、wake内におけるプラズマ波動発生 of 仮説についてこれを実証するロケット実験を行い、これまで論じられることの無かったwake中でのプラズマ波動発生 of 事実を初めて実証し、プラズマ中に形成されるwakeには密度や温度の擾乱とともにプラズマ波動不安定が発生している事を突き止めた。この実証によって、これまでの観測ロケットや人工衛星観測によるプラズマ波動観測データ中には、自然のプラズマが引き起こしている波動現象の他に、飛翔体が周囲のプラズマに与える擾乱の一つとして、wake効果によってもプラズマ波動が発生している可能性があり得ることが初めて示され、本論文の重要な成果となっている。

博士論文とは別に、ロケットを用いたプラズマ計測の結果に関わる研究論文として、英文の学術雑誌掲載論文2編(内1編は第1著者)がすでに公表されており、山本真行は自立して研究活動を行う高度の研究能力と学識を有している。したがって、山本真行提出の博士論文は、博士(理学)の学位論文として合格と認める。